

基於制水閥分區評估自來水管網可靠度

*李沛濠, **高正忠

*博士班研究生, **教授

國立交通大學環境工程研究所

摘要

自來水管線可能因經年累月侵蝕或物理性作用而損壞，而在維修損壞管線時，必須關閉管線周圍的制水閥，因而擴大損壞影響範圍。以往分析管網可靠度時，一般是以管線為單位，並沒有考量損壞管線所在制水閥分區關閉的影響，如此將低估自來水管網系統損壞時的影響，而造成可靠度分析上的誤差，進而影響後續決策。本研究因而採用制水閥分區的觀念，考量管線失敗時所影響的制水閥分區及截斷分區，提出適當的分析方法以進行管網系統的可靠度分析。此外，針對一些管線，當其損壞時，除了會影響其所在的制水閥分區外，可能因其所在位置的不同或所包含的管線元件特性，而具有較嚴重的損壞影響，此種制水閥分區將降低自來水管網系統的整體可靠度，進而影響系統的供水能力。這種關鍵制水閥分區有必要判識出及改善其可靠度。然而要由一個複雜的管網人工判識出制水閥分區，甚為費時且很容易出錯，更遑論找出關鍵制水閥分區，本研究因而發展一套程式，除了判斷制水閥分區，並依據先深後廣搜尋原則，判識出關鍵制水閥分區，以利於了解管網的可靠度，本研究將以一個案例示範應用所發展程式判識出制水閥分區及關鍵分區，並基於制水閥分區網路圖分析管線損壞之實際影響，以及討論只考量單一管線損壞與考量制水閥分區影響間的差異，並說明後續基於制水閥

分區所將進行的一些研究方向。希望能因而改善自來水管網之可靠度，確保自來水用水戶可取得安全可靠而穩定適飲的用水。

前言

以往在進行管網可靠性等相關分析研究時，主要以管線為單位進行研究 (Fujiwara et al.,1998; Shamir et al.,1979)，這樣的考量只有在管網中的每條管線的頭尾兩端都裝置有制水閥時，可於管線發生損壞時關閉單一管線的供水以進行維修更新的工作，才可以以考量單一管線方式進行分析。但如 Walski (1993) 所討論，在實際的系統中，並不存在這樣的管網，當管線損壞時必須關閉週遭的制水閥才可以進行修復。故當管線損壞時，不只影響單一管線，而是影響制水閥所能截斷的獨立供水區域 (此稱為制水閥分區) 及其鄰近之供水。因而若只基於單一管線進行影響分析，則可能導致低估管線損壞所造成的缺水量及影響範圍，並誤導換管規劃最終的決策結果。故在進行自來水管網可靠度分析時，有必要考量制水閥在管網中的影響。

管網損壞分析應考量制水閥在管網中的影響的觀念在 1987 年由 Walski (1987) 提出，Bouchart and Goulter (1991) 曾應用此觀念於提昇自來水管網可靠度上的研究。制水閥所包圍的分區

(segment)常是不規則形狀的管線及節點的組合 (Walski,1993)，雖然制水閥分區可以人工由管線圖上判別出，但這對於大型管網甚為不便且易出錯。然而由於制水閥分區的不規則形狀，造成制水閥分區辨識自動化上的困難，本研究因而探討發展出一個判識制水閥分區之演算程序，便利考量制水閥分區在管網可靠度分析上的影響。Walski(1993)指出若制水閥分區為通往管網其他部分的唯一路徑，則稱這樣的分區為關鍵分區(critical segment)，一旦關鍵分區發生損壞，不但會影響本身分區內的供水，也會影響與其相連下游端之供水，由於其影響範圍更大，故有必要進行判別。本研究亦提出一演算程序以辨識出管網中的關鍵分區。

本研究利用水力模擬模式EPANET2分別以制水閥分區以及單一管線為損壞影響單位，模擬求取管網之損壞影響缺水量，並綜合考量管線之損壞率為缺水量可靠度(shortage reliability)。接著比較在考量制水閥分區影響以及不考量的情況下，管線可靠度的差異性。

研究方法

制水閥分區(valve-enclosed segment)

本研究發展一個可判別制水閥分區的電腦程式。該程式主要是由任一個未標記的節點(unassigned node)，找與節點相連接且尚未登錄至某一制水閥分區的管線，將其納入目前的制水閥分區中，若這些管線的另一端是一個制水閥，則停止擴張目前的制水閥分區，若不是，則繼續由另一端的節點繼續擴張目前的制水閥分區，直到無法擴張時，則再由一個未曾標記的節點重新決定下一個制水閥分區所包含的管線。直到所有管線均被登錄到特定的制水閥分區為止。

關鍵分區(critical segment)

雖然Walski(1993)曾簡單的描述以breadth-first-search (BFS) 判別管網中之關鍵分區。但因其未提供詳細步驟且BFS法可能較花時間，故本研究改用depth-first-search 演算法，此方法可由不少資料結構的書中找到 (e.g., Horowitz et al.,1993)，在分析圖形之連接特性時所使用的演算程序以進行關鍵分區的判識。本研究採用的演算程序主要在找尋圖形(graph)中之連結節點(articulation point)，而連結節點為可以將圖形切割成數個子圖形(subgraphs)的接合點，也就是圖形中數個子圖形唯一的連接點。此演算程序所定義之連結節點與Walski(1993)針對經制水閥分區判識而得之制水閥分區特性網路所定義之關鍵分區是同樣的道理。所以本研究採用此演算程序進行制水閥分區特定網路之關鍵分區節點的判識工作。

此演算程序以DFS進行搜尋，搜尋之順序以depth first number (DFN)表示，並與圖形中每個節點的Low number進行比較，Low number依式(1)決定。

$$\text{low}(u) = \min \{ \text{dfn}(u), \min \{ \text{low}(w) \mid w \text{ 為 } u \text{ 的子節點} \}, \min \{ \text{dfn}(w) \mid (u,w) \text{ 為後對邊} \} \} \quad (1)$$

若節點之DFN小於等於其子節點之Low number則這個節點就是連接節點，此演算程序的作用原理是應用兩數的比較以確定是否有除了tree edge還有其他edge的存在可以連接通往根節點的方向，若沒有則可以確知通過節點的edge為唯一路徑，此節點即為連接節點。本研究首先依據原始管網之分區判識演算結果得到一個制水閥分區特性網路，然後採用上述方法判別出管網中的關鍵分區。

分區損壞影響模擬(使用EPANET2)

為了解實際分區損壞所造成的影響，本研究利用 EPANET2(Rossman, 2000)對於各個經由程式辨識出的制水閘分區，模擬分區因所包含的管線發生損壞時，因整個制水閘分區關閉所造成的損壞缺水量，以分析更合乎實際狀況下的管網損壞影響。另外，亦模擬求取以單一管線為影響單位下的損壞缺水量，以便比較兩種不同考量下的損壞影響。

管線損壞率

自來水管線會因為過大的傳送水量、溫度變化或是腐蝕而發生損壞，其損壞發生率與管徑大小、所在位置以及管材相關 (Su et al., 1987)。由於本研究無法取得管網維修換管資料，故採用 Walski et al. (1982) 針對實際之維修紀錄所迴歸出的損壞率預估式以估算管線之失敗率，由於台灣的溫度沒有太大的變化及沒有過去維修的資料，故忽略迴歸式中溫度以及過往損壞影響之校正係數，最後本研究所採用之失敗機率估算公式如下：

$$N(t) = 0.02577 c e^{0.0207(t-k)} \quad (2)$$

其中 $N(t)$ 為現年度 t 之失敗機率， c 為反應不同管徑大小對損壞率影響的校正因子，而 k 為管線裝設年度， $N(t)$ 則為在年度 t 管線預估每年每英哩可能產生的壞管次數。並且因為管線發生損壞為一隨機的分布並不限定在哪一個時間點，所以可以設定其分布為 Poisson distribution，並應用其分布特性取得管線之失敗機率 (Su et al., 1987)，其轉換公式如下：

$$P_j = 1 - e^{-\beta_j} \quad (3A)$$

$$\beta_j = \gamma_j L_j \quad (3B)$$

其中， P_j 為管線 j 的損壞機率， β_j 管線 j 每年可能發生的損壞次數， γ_j 為管線 j 預期每年每單位長度所會發生的損壞次數， L_j 為管線 j 的長度。

缺水量可靠度(shortage reliability)

由於管線損壞所造成的影響，將會隨著其所在的制水閘分區而有所不同，也因此形成不同的損壞影響權重。本研究為反應在考量制水閘分區影響下之管線損壞影響程度，以管線所屬制水閘分區之損壞缺水影響量乘上管線損壞率為管線之缺水量可靠度。其計算公式如下所示：

$$SR_j = P_j \times SS_i \quad (5)$$

其中， SR_j 為管線 j 之缺水量可靠度， P_j 為管線 j 的損壞機率， SS_i 為分區 i 之損壞缺水量。當其量值愈大時，表示管線愈不可靠，愈可能對管網系統造成較大的損壞影響。反之，若愈小則表示愈可靠。

案例研究

本研究利用一個虛擬的案例，來示範所發展出的判識程式，以及評估各管線之可靠度。本研究所採用的虛擬案例如圖一所示，為一具有 33 條管線、14 個制水閘以及 39 個取水節點的管網系統，總管長為 2057 m，總取水量為 224270 CMD。圖一中之十字符號表示制

水閘節點，星號表示取水節點，右下角之節點為此管網系統之供水節點。

利用制水閘分區辨識程式，可將以制水閘截斷之管線裝置歸屬於同一個分區。虛擬管網經辨識轉換後可以得到如圖二之制水閘分區管網圖，總計取得共 8 個分區，並以中空圓形表示制水閘分區，各分區所包含的相應管線資料則如表一所示，各分區之間的連接關係以黑色實線加以表示，如此則形成一個以制水閘分區為節點之特性管網圖形。而原本管網系統之管線則改以虛線標示之。圖中之灰色圓形符號則為利用演算程序(1)辨識制水閘分區特性管網，所得之關鍵分區節點，總計有分區 4、5 兩個關鍵分區節點。

接著利用 EPANET2 模擬各個制水閘分區發生損壞而關閉時，所造成的影響缺水量，各分區之損壞影響缺水量如圖三所示。同時，為了比較與不考量制水閘分區下的損壞影響，假設各管線可以單獨關閉而模擬其損壞影響，則可以得到如圖四所示之損壞缺水量分布圖。

接著利用(3A)(3B)等式估算各管線之損壞率，結果如圖五所示。然而管線損壞影響應該同時考量其所造成的損壞缺水量，並以此為權重才能充分反應出管線在整體管網系統中的可靠度。一般若將管線視為損壞分析單位，則可以其損壞缺水量代入(5)式得到如圖六之缺水量可靠度影響分布圖。而實際上，管線損壞之影響缺水量應該為關閉制水閘分區後，所造成的影響缺水量值，因此在考量制水閘分區影響下，可以得到如圖七之管線缺水量可靠度分布圖。明顯可以發現，各管線之損壞影響都有上升的狀況，並且也顯示出不同的管線可靠度分布。

結果與討論

由圖三以及圖四之兩種考量下之損壞影響缺水量可以發現，在單以管線為損壞影響單位時，各管線所造成的損壞影響缺水量值明顯較各制水閘分區所造成的影響缺水量值小很多。即使是在考量單一管線影響下的具較大影響缺水量的 14 號管線，其缺水量值(30477CMD)相較於其所在的 4 號制水閘分區之損壞缺水量(116212CMD)要小。這是因為關閉制水閘所造成的分區，一方面其涵蓋的管線裝置範圍較廣，而所包含的供水量亦較大。另一方面，由於分區所包含的範圍較廣，更容易對於整體管網系統造成顯著的水力影響，使得供水條件劣化。

而制水閘分區也會因為其在管網系統中所在的位置不同而產生不同的影響，如圖二中所示之關鍵分區 4、5，因為其關閉除造成分區內無法供水，也影響到下游端之其他各制水閘分區，而形成更大的損壞缺水量，如圖三所示。而圖三中之 1 號制水閘分區，因其包含有管網之供水節點，若此分區內之管線發生損壞，將造成整個管網停止供水，所以其損壞缺水量為整個管網的總供水量。

而圖五以及圖六則顯示出在基於單一管線以及基於制水閘分區損壞影響下，基於單一管線的管線顯得較為可靠，而其實若將維修作業的制水閘關閉所造成的實際影響，則可以發現各管線之可靠度有下降的情況(缺水量可靠度量值上升)。並且各管線的可靠度分布上也有不同的差異，比如在考量單一管線影響下，管線 1、14、15 以及 31 為管網系統中較不可靠的管線。但是在考量制水閘分區影響下，則反而管線 1、2、8、9、14、24、25 為管網中較不可靠的管線。這是因為這些管線多包含在損壞影響較大的制水閘分區中，比如管線 14、24、25 便是在關鍵分區 4，使得這些管線若發生損壞會對整個管網產生更大的

影響，因此這些管線的可靠度也就明顯較差。在這兩種考量下，管線 1 都是最不可靠的管線，這是因為若管線 1 發生損壞將直接造成整個管網停止供水，所以會有這樣的現象。

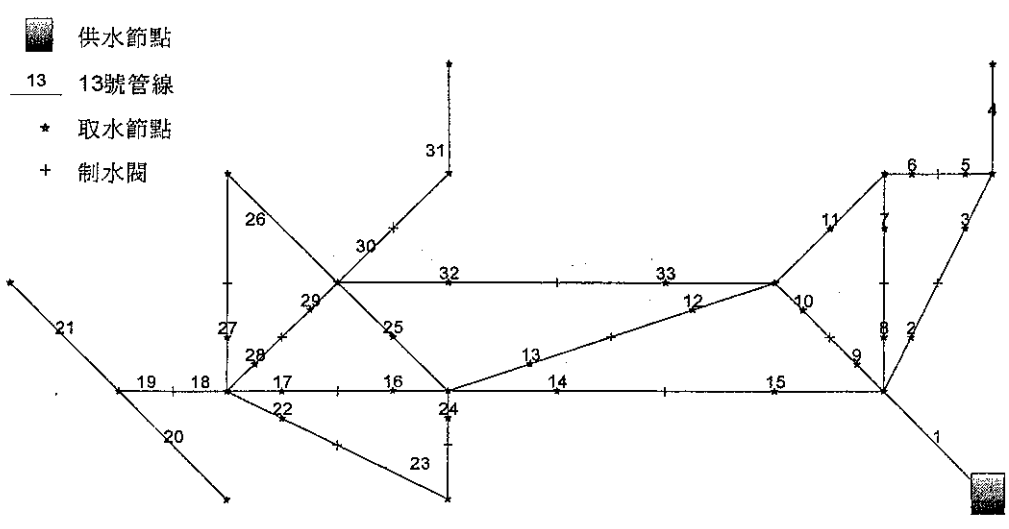
結論與未來研究方向

由以上各節之研究探討，可以發現經本研究所發展出的制水閥分區辨識程式轉換後，所得之制水閥分區特性管網，明顯較原始管網圖形簡化，故若以制水閥分區為損壞影響單位，不僅可以得到更合理的分析結果，也可以在相關研究更為便利。而各制水閥分區的損壞影響程度，明顯與所在的位置相關，比如關鍵分區便具有較大的損壞影響量。本研究的研究成果也顯示出，在將管線視為單一影響單位時，管線可靠度明顯較考量所在制水閥分區影響下之可靠度為佳。然而，基於實際維修作業上的操作，以制水閥分區為損壞影響單位應為較合理的分析方式，也因此會擴張個別管線損壞之影響程度。若是以傳統方式進行可靠度分析，將高估各管線之可靠度，並可能造成將實際上較為不可靠的管線視為具有較高的可靠度。進一步影響後續之決策分析，而造成資源的浪費。因此，在進行管網之可靠度分析時，應考量制水閥分區的實際影響，以其改善決策分析之品質。

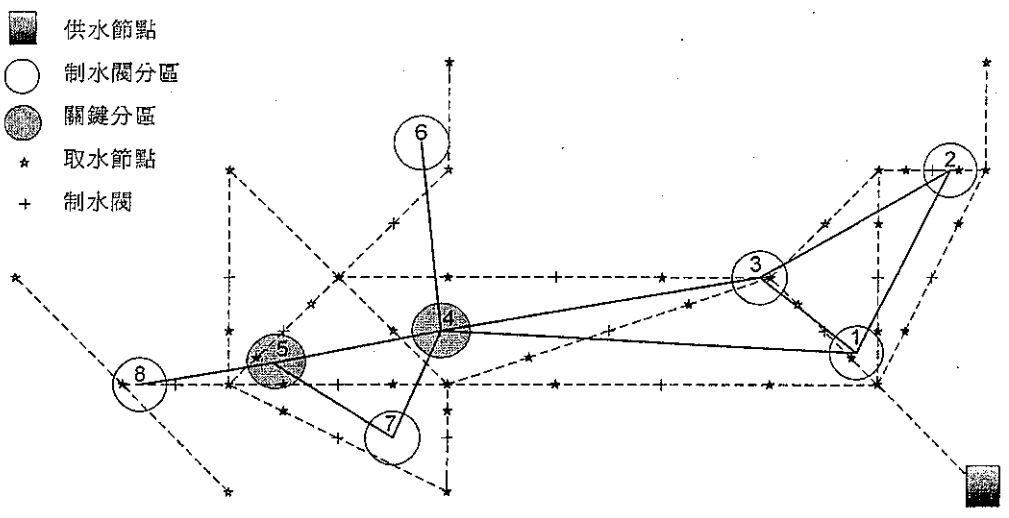
在後續的研究中，將基於制水閥分區在管網系統的影響，研究如何提昇管網之整體可靠度。比如發展一個優選模式，選取較不可靠的管線進行換管，以有效改善整體可靠度。亦將研究探討如何以增設管線或是其他方式，消除管網系統中較不可靠的制水閥分區，比如關鍵分區等，使管網中不再存在影響缺水量過大的制水閥分區，提昇管網的可靠度以維持用水戶安全穩定的供水。

參考文獻

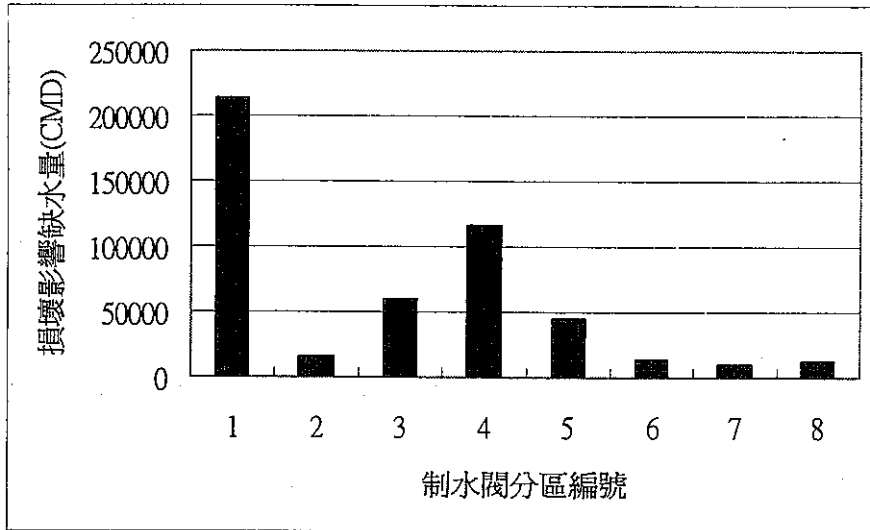
1. Bouchart, F., and I. Goulter, Reliability Improvements in Design of Water Distribution Networks Recognizing Valve Location, *Water Resources Research*, 27(12), 3029-3040, 1991.
2. Fujiwara, O., and J. Li, Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-Dependent Demand, *Water Resources Research*, 34(7), 1834-1850, 1998.
3. Horowitz, E., S. Sahni, and S. A. Freed, Biconnected components and articulation points, in *Fundamentals of Data Structures in C*, pp. 278-283, Computer Science Press, New York, N.Y., 1993.
4. Rossman, L.A., EPANET2 users manual, Risk Reduction Engineering laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.
5. Shamir, U., and Howard, C. D., An Analysis Approach to Scheduling Pipe Replacement, *Journal AWWA*, 71(5), 249-258, 1979.
6. Su, Y.C., L. W. Mays, N. Duan, and K. E. Lansey, Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution Systems, *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(12), 1539-1556, 1987.
7. Walski, T.M., and A. Pelliccia, Economic analysis of water main breaks, *Journal of American Water Works Association*, 74(3), 140-147, 1982.
8. Walski, T.M., Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, 42, 21-27, 1993.
9. Walski, T.M., Discussion of "Quantitative approaches of reliability assessment in pipe networks" by Goulter and Coals, *Journal of Transportation Engineering*, 113(5), 585-587, 1987.



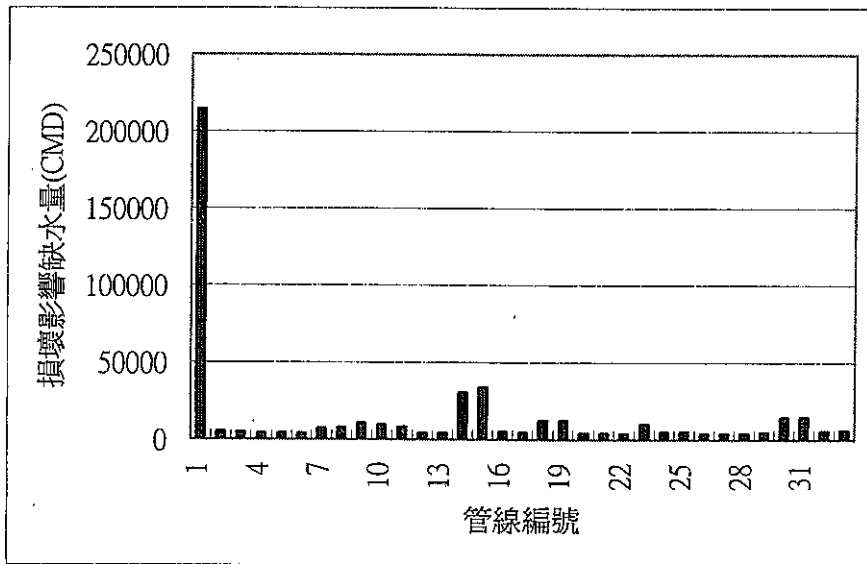
圖一 虛擬案例管網



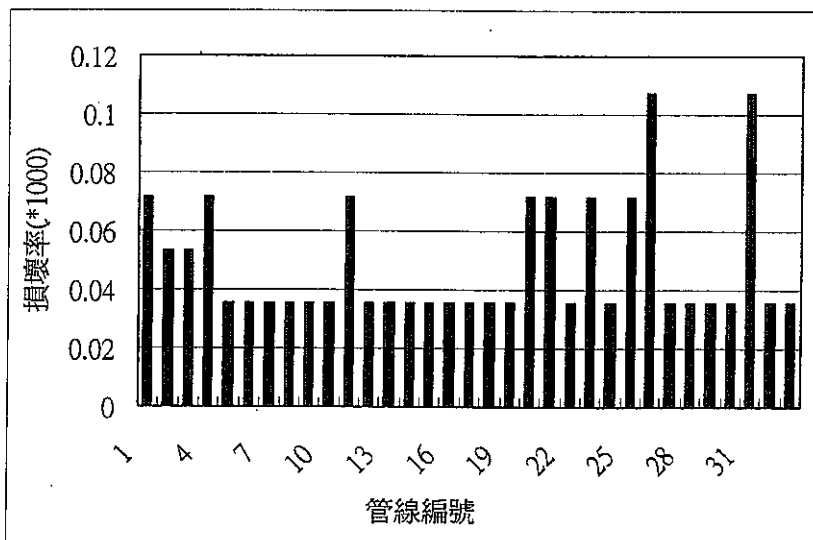
圖二 制水閥分區特性管網圖

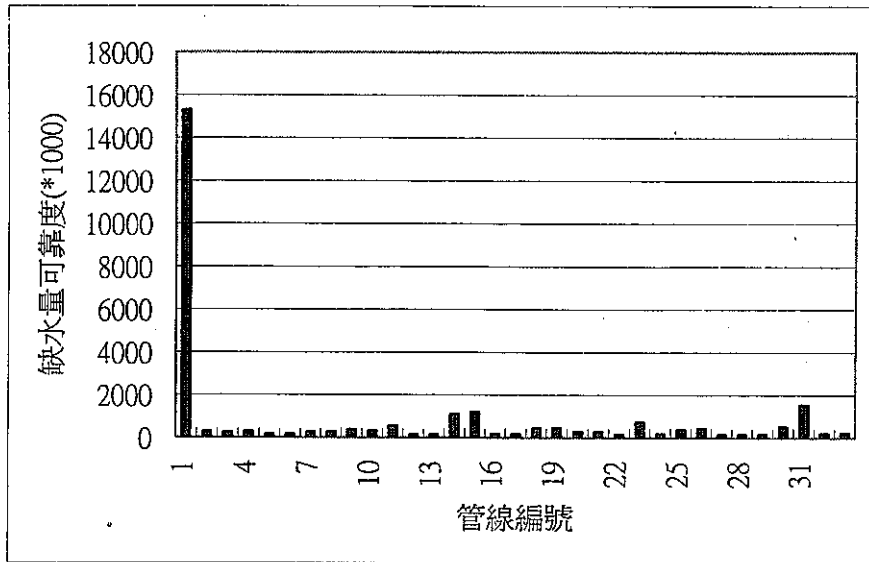


圖三 制水閥分區損壞影響缺水量分布圖

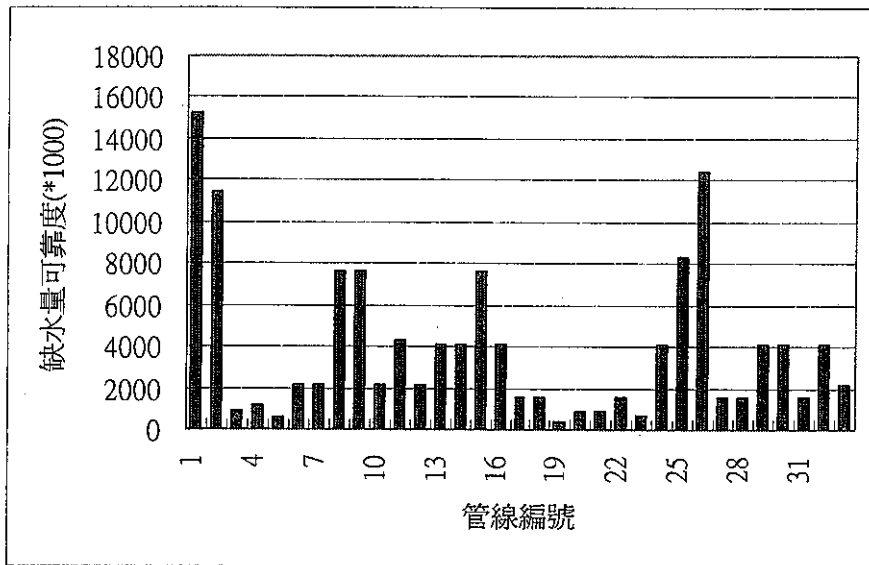


圖四 管線損壞影響缺水量分布圖





圖六 基於管線之缺水可靠度



圖七 基於制水閥分區之缺水可靠度

表一、各分區所包含之管線編號表

分區編號	分區所包含之管線編號
1	1、2、8、9、15
2	3、4、5
3	6、7、10、11、12、33
4	13、14、16、19、24、25、26、29、30、32
5	17、18、22、27、28
6	31
7	23
8	19、20、21